

УДК 621.397.6.049.77

*Канд. техн. наук Б. Д. Платонов,
П. П. Мяконосов и Н. В. Шитов*

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ АППАРАТУРЕ

Рассмотрены пути оптимизации соединения многовыводных ИС высокой степени интеграции с учетом развития и повышения сложности телевизионной аппаратуры. Показано, что наиболее перспективное направление оптимизации соединения ИС — разработка многослойных коммутационных плат. Проведен анализ основных типов этих плат с точки зрения электрических, технологических и экономических показателей. Показано, что для построения функционально законченных блоков телевизионной аппаратуры, наиболее полно отвечающих требованиям оптимизации межсхемных соединений, необходимо применение крупноформатных плат, способных выполнять роль элементов несущих конструкций и согласованных по величине коэффициента теплового расширения с конструкционными материалами аппаратуры и безвыводных корпусов ИС.

Одна из актуальных проблем современного телевидения — переход к сложным системам цветного цифрового телевидения (ЦЦТ). Решение этой проблемы предполагает интенсивное развитие интегральной электроники. Если сейчас наибольший объем выпускаемой аппаратуры выполняется на базе простейших полупроводниковых и гибридных ИС, то для изготовления следующего поколения аппаратуры потребуются схемы III — IV степеней интеграции. При дальнейшем развитии телевизионной аппаратуры в виде отдельных ИС будут выполняться узлы оперативных и постоянных запоминающих устройств на часть строки, строку, часть кадра, кадр; узлы управления памятью; формирователи синхросигналов; кодеры и декодеры различного назначения; рекурсивный, трансверсальный, пространственный, временной и др. фильтры и т. д. Все эти узлы должны быть функционально законченными и выполнены на одном кристалле. Поэтому их сложность достигнет 10^4 — 10^6 элементов на кристалл. Следовательно, переход к системам ЦЦТ потребует увеличения степени интеграции ИС еще на 1—2 порядка.

Ежегодное повышение степени интеграции примерно в 2 раза, происходящее за счет уменьшения элементов и роста размеров кристалла, сопровождается увеличением числа выводов ИС [1]. Ожидается, что к 1990 — 1995 годам размеры элементов ИС сократятся примерно до 1 мкм и будут близки к теоретическому пределу [2]. Число выводов m_n

станет более 100. Вследствие малых размеров, следовательно, и паразитных емкостей элементов, частотные свойства ИС будут отвечать требованиям построения систем ЦЦТ с тактовой частотой 100 МГц и более. Однако разработка аппаратуры на основе ИС с $m_B \approx 100$ неизбежно

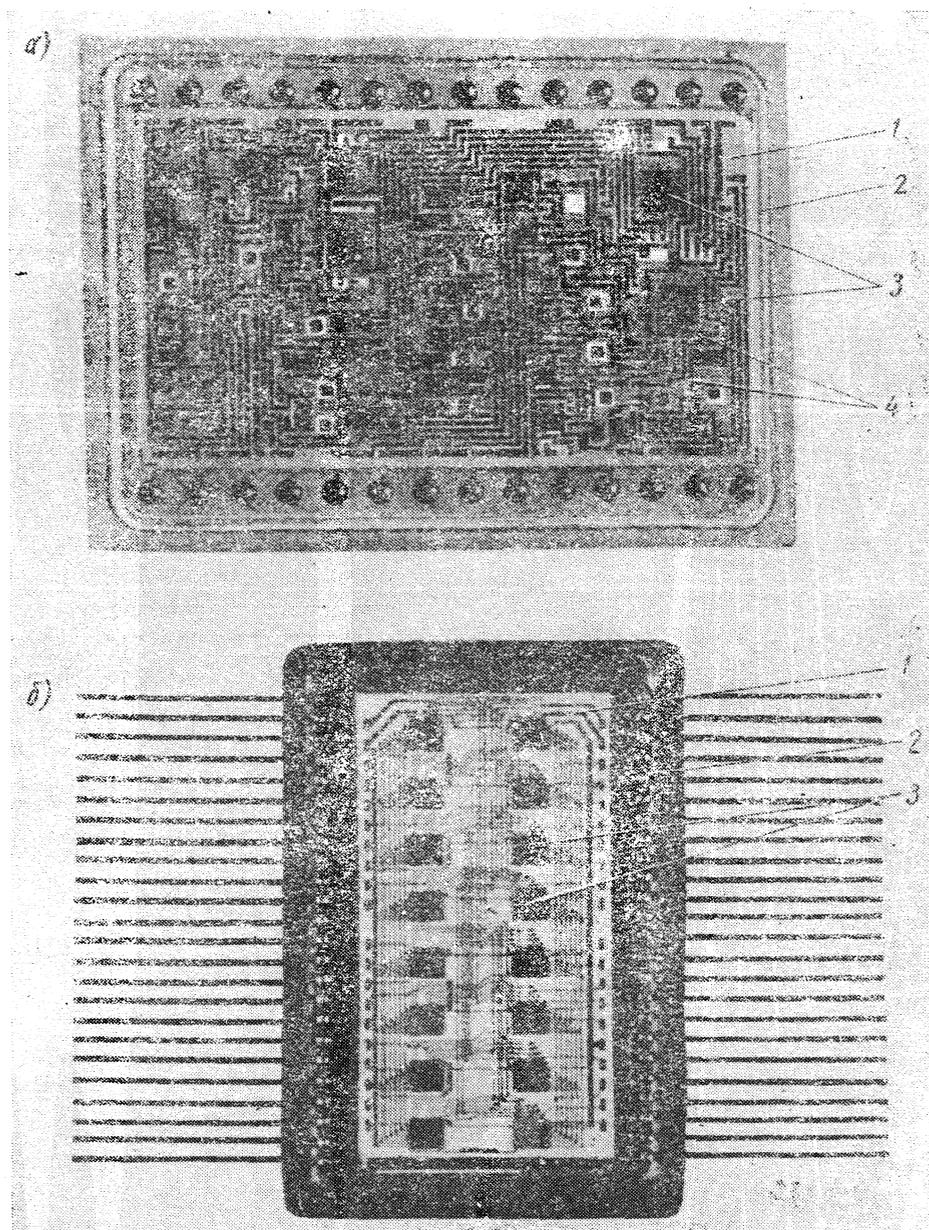


Рис. 1. Герметизируемая ГИС на бескорпусных полупроводниковых приборах с гибкими (а) и жесткими (б) выводами
1 — коммутационная плата, 2 — основание металло-стеклянного корпуса, 3 — полупроводниковые приборы, 4 — гибкие выводы

приведет к повышению количества межсхемных связей и внешних контактных соединений. И поскольку величина паразитных емкостей и индуктивностей зависит от взаимного расположения и протяженности электрических связей, а надежность аппаратуры от количества контактных соединений [3], создание сложных систем ЦЦТ может оказаться невозможным, если не решить задачи оптимизации электрических соединений ИС между собой.

Оптимизация соединения ИС является важной частью проблемы комплексной миниатюризации телевизионной аппаратуры и содержит ряд противоречивых требований. К ним относится повышение плотности расположения соединительных проводников (λ) и других пассивных элементов схемы, уменьшение паразитных емкостей и индуктивностей, способных в 5—10 раз ухудшить быстродействие аппаратуры, сокращение числа внешних контактных соединений, снижающих ее надежность, создание прецизионных резисторов для аналоговых устройств — неотъемлемой части телевизионной аппаратуры и т. д. Наиболее перспективное направление оптимизации соединения ИС — это разработка и изготовление коммутационных плат, удовлетворяющих перечисленным требованиям.

Цель данной работы — рассмотрение путей оптимизации межсхемных соединений телевизионной аппаратуры с помощью коммутационных плат и проведение сравнительного анализа различных видов указанных плат, изготавливаемых методами гибридно-пленочной технологии. Выбор путей оптимизации зависит от конструкторско-технологических особенностей элементной базы и способов повышения λ на коммутационных платах.

Существующая элементная база разделяется на две основные группы.

К первой группе относятся бескорпусные полупроводниковые приборы без выводов (кристаллы), с гибкими или жесткими выводами и на лентах-носителях [4]. Они имеют малые размеры и массу и наиболее полно отвечают требованиям миниатюризации аппаратуры, так как допускают уменьшение шага t координатной сетки коммутационной платы до 0,1 мм [5]. Но бескорпусные приборы необходимо дополнительно герметизировать. Поэтому они имеют узкую область использования и применяются только в герметизируемых ГИС (рис. 1) и гермоблоках.

Размеры платы в этом случае ограничены, в частности размерами гостированного ряда металло-стеклянных корпусов ГИС.

Ко второй группе компонентов относятся полупроводниковые приборы в микрокорпусах [6]. Основные достоинства этих приборов (рис. 2) в том, что они пригодны для автоматизированного монтажа, не требуют дополнительной герметизации, могут устанавливаться на крупноформатные коммутационные платы, имеющие размеры традиционных печатных плат, и обеспечивают

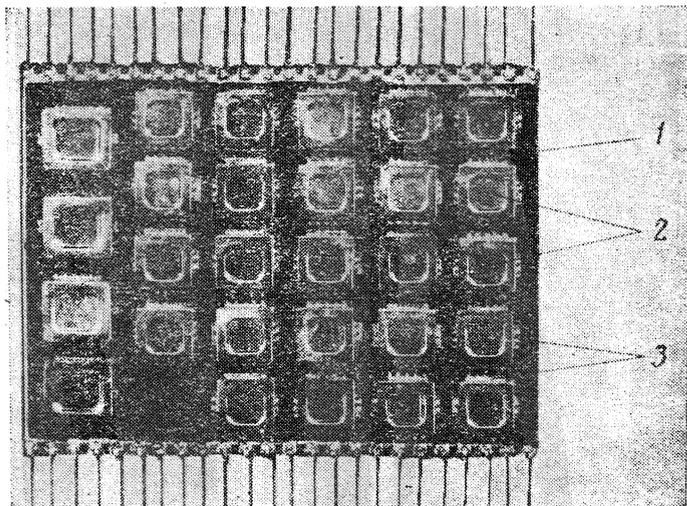


Рис. 2. Устройство, выполненное на полупроводниковых приборах в микрокорпусах

1 — коммутационная плата, 2 — микрокорпусы, 3 — выводы микрокорпусов

возможность контроля электрических параметров и электротермотренировки прибора перед установкой на плату. Однако изготовление микрокорпусов очень трудоемко и сопровождается значительным рас-

ходом драгоценных металлов (расход золота на микрокорпус в 10 раз больше, чем на бескорпусной компонент). Кроме того, для установки этих приборов требуются платы с шагом $t > 0,4$ мм [5]. Применение компонентов в микрокорпусах при имеющейся тенденции к уменьшению размеров элементов ИС может служить причиной сбоев работы аппаратуры из-за влияния α -частиц, излучаемых стенками керамического корпуса [7].

При замене полупроводниковых приборов в традиционных корпусах элементами в микрокорпусах возможна комплексная миниатюризация телевизионной аппаратуры. С помощью ГИС, изготовленных в корпусах, пригодных для автоматизированного монтажа, могут быть улучшены электрические параметры аппаратуры. Однако массо-габаритные показатели, надежность и быстродействие такой аппаратуры будут хуже, чем в аппаратуре, выполненной на бескорпусных элементах [3].

Следует отметить, что обе рассмотренные группы компонентов объединяют элементную базу малой и средней мощности. Полупроводниковые элементы большой мощности требуют массивных теплоотводов и, как правило, не могут располагаться на диэлектрических платах. Миниатюризация блоков телевизионной аппаратуры, рассеивающих высокие мощности, требует специального рассмотрения и выходит за рамки настоящей статьи.

Для оптимизации соединения ИС и миниатюризации аппаратуры используют следующие виды плат: толстопленочные, тонкопленочные, выполненные по совмещенной технологии, и тонкопроводные, изготовленные с применением объемного изолированного провода. Повышение плотности λ на упомянутых платах достигается уменьшением величины t и увеличением числа слоев коммутации n_k , так как $\lambda = n_k/t$. В соответствии с этим различают однослойные ($n_k = 1$) и многослойные ($n_k > 1$) коммутационные платы.

В ГИС аппаратуры третьего поколения наибольшее применение находят однослойные платы, содержащие наряду с пленочными проводниками и контактными площадками толсто- или тонкопленочные резисторы [8].

Уменьшение шага $t = b + b_3$, диктуемое требованиями миниатюризации, за счет уменьшения ширины b элементов и зазоров b_3 между ними отрицательно сказывается на электрических параметрах и технологических показателях изготовления плат. Известно [9], что

$$R \propto lb^{-1}, \quad C \propto \ln^{-1}(1 + 2b_3/b),$$

где R — сопротивление пленочного проводника,

l — длина этого проводника,

C — величина емкости единицы длины двух параллельных проводников, расположенных в одной плоскости.

Отсюда видно, что с уменьшением величин b и b_3 значения R и C возрастают. В однослойных платах имеет место увеличение l из-за невозможности реализации трассировки наикратчайшим путем. Это приводит к дополнительному возрастанию R и lC , что ограничивает функциональные возможности интегральных, в особенности аналоговых, схем.

На рис. 3 показано влияние ширины тонкопленочных резисторов на их точность $\delta = \frac{\Delta R}{R} 100\%$, где $\Delta R = R_p - R_0$, R_p и R_0 — реальное и расчетное значения пленочного сопротивления. Из рисунка видно, что точность δ падает при уменьшении b из-за возрастающего влияния величины подтравы Δb . Характер снижения процента выхода годных плат при уменьшении b представлен на рис. 4. Поскольку надежность изделий

коррелируется с процентом выхода годных, то сейчас уменьшение величины $b \approx b_3$ ограничивают оптимальным значением величины b_0 , равной для тонко- и толстопленочных плат 0,25 и 0,5 мм соответственно. При $b \approx b_3 > b_0$ ухудшение электрических параметров и снижение процента выхода годных и надежности плат не наступает.

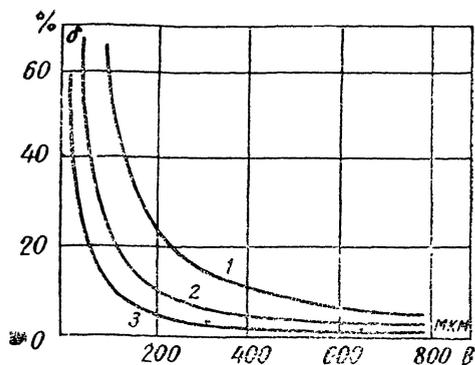


Рис. 3. Влияние ширины пленочных резисторов на их точность. Величина подтравы Δb , равна 40 (1), 20 (2) и 10 мкм (3)

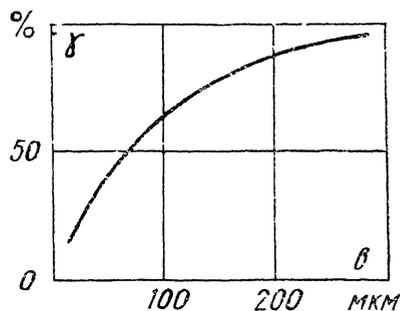


Рис. 4. Зависимость процента выхода годных коммутационных плат от ширины элементов

На рис. 5 показана вероятность соединения элементов схемы β в зависимости от удельной плотности расположения контактных площадок $n_{уд}$ и величины λ . Изменение β в пределах от 0 до 1 отражает квалификацию разработчика топологии. При увеличении λ разработчик меньшей квалификации способен скомутировать элементы более сложной

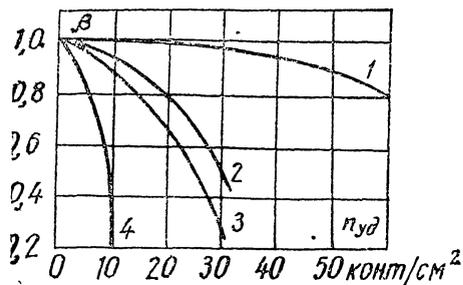


Рис. 5. Вероятность соединения элементов схемы в зависимости от плотности размещения контактных площадок и пленочных проводников

- 1) $\lambda=20$ лин/мм, 2) $\lambda=10$ лин/мм,
3) $\lambda=5$ лин/мм, 4) $\lambda=3$ лин/мм

сборки. Это обусловлено жесткостью привязки контактных площадок к элементам схемы на плате и необходимостью соблюдения требований соответствия расположения контактных площадок и выводов ИС [4].

Возможность повысить λ при сохранении оптимальных значений b и b_3 возникает при увеличении $n_{к}$. Поэтому для оптимизации межсхемных соединений телевизионной аппаратуры следующих поколений необходимо применять многослойные коммутационные платы (см. рис. 6 и таблицу).

Из рисунка и таблицы видно, что в зависимости от конструкции типы плат существенно различаются по электрическим параметрам, разрешающей способности, габаритным размерам, возможности приме-

схемы на плате заданной площади и формы, так как с ростом λ увеличивается число возможных независимых электрических соединений, повышающих вероятность соединения большего количества $n_{уд}$. Это свидетельствует о том, что с ростом λ плотность размещения многовыводных ИС на плате может быть повышена. Поскольку увеличение λ не должно приводить к нарушению неравенства $b \approx b_3 \geq b_0$, становится очевидным, что однослойные платы не перспективны для оптимизации электрического соединения многовыводных ИС. Значительные трудности в осуществлении соединения ИС предстоят тогда, когда необходимо выполнить требования автоматизации

нения перспективной элементной базы и т. д. Для построения функционально законченных блоков телевизионной аппаратуры наиболее перспективны механически прочные крупноформатные платы на достаточно пластичном основании, способном выполнять роль элемента несущей конструкции. Преимущество крупноформатных плат заключается в сокращении числа сварных или паяных контактных соединений, снижении трудоемкости монтажа ИС и, как следствие, повышении надежности аппаратуры. Платы изготавливаются методами гибридно-пленочной

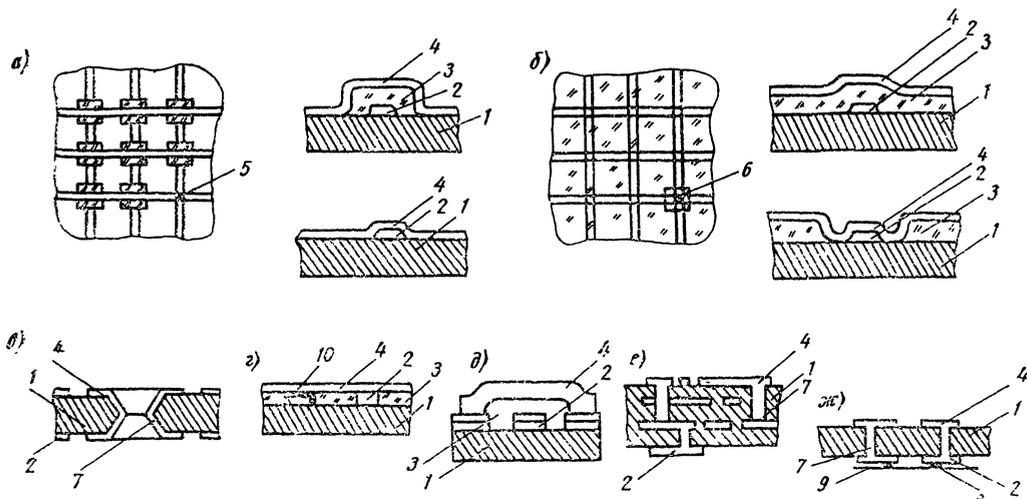


Рис. 6. Типы многослойных коммутационных плат: с изоляцией в местах пересечений (а), с изолирующим слоем и переходными отверстиями (б), с использованием обеих сторон подложки (в), на основе анодированного алюминия (г), с воздушной изоляцией пересечений проводников (д), на основе многослойной керамической структуры (е), с использованием объемного изолированного провода (ж)

1 — диэлектрическое основание, 2 — проводники нижнего уровня, 3 — межслойная изоляция, 4 — проводники верхнего уровня, 5 — пленочное контактное соединение, 6 — межслойный переход, 7 — металлизированное отверстие, 8 — паяное (сварное) контактное соединение, 9 — объемный изолированный провод, 10 — плотный окисел Al_2O_3

технологии [8]. При этом число слоев коммутации n_k не имеет теоретического предела. К настоящему времени в лабораторных условиях получены платы на основе толстопленочной технологии с $n_k = 15$ при $b = b_3 = 0,25$ мм на площади 100×120 мм², на основе тонкопленочной технологии с $n_k = 10$ при $b = b_3 = 0,1$ мм на площади 100×100 мм² с применением полиимидной пленки и на основе многослойной керамики с $n_k > 20$ на площади 50×50 мм².

Наиболее сложные задачи при изготовлении таких плат состоят в создании межслойной изоляции, межслойных контактных переходов и формировании прецизионных резисторов.

В качестве материалов межслойной изоляции используют пленки органических диэлектриков, например полиимидные, фоторезистивные или пленки окислов и систем окислов, например окись кремния, бесщелочные низкотемпературные стекла и т. д. При формировании пленок этих материалов, а также при их эксплуатации неизбежно возникают структурные дефекты в виде пор, микротрещин, локально напряженных областей и т. д. Поэтому диэлектрические свойства межслойной изоляции, определяющие рабочее напряжение U и величину паразитной емкости C платы, зависят от плотности распределения дефектов P_d и толщины изолирующей пленки h . Величина h , в зависимости

Основные характеристики многослойных коммутационных плат

Параметр	Тип плат									
	тонкопленочные						толстопленочные		многослойная керамика	тонкопроводные
	$n_k=1$	$n_k=2$ (с неорганическим диэлектриком)	$n_k=2$ (с органическим диэлектриком)	с использованием Al_2O_3	на полиимидной пленке и анодированном алюминии	с воздушной изоляцией	с двусторонней коммутацией	$n_k \geq 2$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ширина пленочных проводников b и зазоров между ними b_3 , мкм	30 — 50	100	30 — 50	50 — 100	100	100 — 150	250	250 — 300	300	∅ 40
Минимальный шаг переходных отверстий, мкм	—	100	50	100	300	200	300	1300	800	500
Экономически целесообразное n_k	—	2	2	2	3 — 6	2	3	3 — 6	5 — 10	—
Удельная паразитная емкость, пФ/см	—	1 — 2	1 — 2	5 — 10	0,9	0,5	0,5	2,0	0,5	0,2 — 0,5
Удельное сопротивление проводников, Ом·см	1,0	1,0	1,0	2,0	0,1	0,1	10,0	10,0	15 — 20	1 — 3
Максимальный размер платы, мм ²	120×100	120×100	120×100	50×50	100×100	50×50	48×60	120×100	50×50	Свыше 250×250
Количество соединяемых контактных площадок на единице площади, не более, конт/см ²	15	40	50	40	60	30	40	40	60	30
Ремонтоспособность	Хорошая	Удовл.	Удовл.	Плохая	Хорошая	Хорошая	Плохая	Плохая	Плохая	Хорошая
Возможность визуального контроля	Есть	Есть	Есть	Затруднена	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Есть
Применяемая элементная база	Любая	Любая	Любая	Бескорпусные ИС с гибкими выводами	Любая	Бескорпусные ИС с гибкими выводами	Любая	Любая	Любая	Любая

от технологии изготовления многослойной платы, изменяется от единиц (тонкопленочные) до десятков и сотен микрон (в случае использования многослойной керамики, полиимидной пленки). В соответствии с этим напряжение U между проводящими слоями принимает значения от единиц до нескольких десятков вольт.

На рис. 7 показано изменение емкости C между проводниками разных уровней в зависимости от типа многослойной платы. Для снижения C наряду с применением изоляционного материала с малой диэлектрической проницаемостью используют конструктивные приемы, например увеличение h . Примером может служить изготовление платы с воздушной изоляцией пересечений проводников (рис. 6 д) [10], с изоляцией пересечений проводников толстым слоем фоторезиста (рис. 6 а) [11], двусторонних плат на гибкой полиимидной подложке или керамике (рис. 6 в) и т. д. Снижение емкости при этом может достигать 1—2 порядков (рис. 7, кривая 4). Однако такие приемы, как правило, снижают технологичность плат.

Межслойные контактные переходы (рис. 6 б) необходимы для электрической связи между разными слоями платы. Они представляют собой сквозные отверстия в изолирующем слое, стенки которых покрыты металлом. Очевидно, что с увеличением числа межслойных переходов Q , определяемого выражением [12]: $Q = (1 \div 1,5) m_v N_{ис}$, где $N_{ис}$ — число ИС на плате, изолирующий слой теряет механическую устойчивость. Допустимая плотность распределения межслойных переходов q зависит от механических свойств и размеров материала изолирующего слоя, от усилий, действующих в этом слое, от размеров и формы отверстий переходов, технологии их изготовления и т. д. Для более пластичных материалов величина q имеет большее значение (см. таблицу), чем для хрупких. Поэтому применение органических диэлектриков в качестве изолирующего слоя позволяет уменьшить площадь $S \approx Q/q$, занимаемую переходными отверстиями на поверхности платы.

Величина q лимитирует значение λ в плате. Чтобы повысить q , обычно уменьшают диаметр переходных отверстий. При этом, однако, затрудняется процесс покрытия металлом стенок отверстий и снижается надежность межслойных переходов. Нарушение контакта, как правило, происходит в области пересечения рабочих поверхностей изолирующего слоя со стенками переходных отверстий. Поэтому стенки отверстий выполняют наклонными под углом $15—45^\circ$ к поверхности платы. На практике диаметр отверстия зависит от толщины h и составляет не менее 0,05 мм.

Опыт показывает, что пленочные резисторы с точностью 0,1—0,5% для аналоговых ГИС могут уверенно формироваться только на поверхности подложки. Изготовление встроенных резисторов, размещаемых на изолирующих слоях платы, не обеспечивает требуемых электрофизических параметров. Это обусловлено, в частности, невозможностью осуществления процесса доводки встроенных резисторов до требуемого

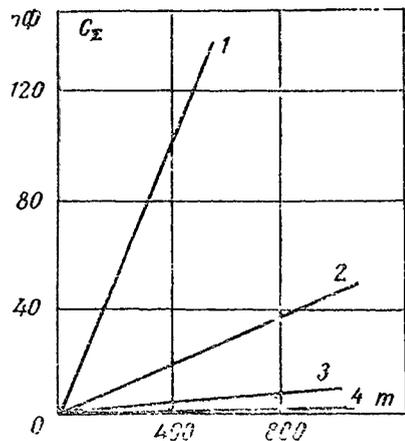


Рис. 7. Изменение суммарной емкости между проводниками разных уровней платы в зависимости от количества пересечений и материала межслойной изоляции
1 — Al_2O_3 , 2 — фоторезист ФН-11К, 3 — полиимидная пленка, 4 — воздушная изоляция пересечений

значения известными методами. Поэтому при $n_k > 2$ прецизионные резисторы изготавливают на отдельных платах и монтируют как навесные пассивные компоненты — в виде «чипов».

Увеличение n_k , Q и размеров платы способствует миниатюризации и оптимизации соединения ИС, но в то же время повышает трудоемкость изготовления и процент брака плат. Так, при изготовлении толсто пленочных плат с $n_k = 5$ количество бракованных изделий в 2—3 раза больше, а с $n_k = 15$ — в 10 раз больше, чем для однослойных коммутационных плат [13]. 20-процентный выход годных многослойных плат с $n_k = 3$ достигается для $Q \lesssim 100$ при условии годных межслойных переходов $\gamma = 99,2\%$, а для $Q \approx 500$ — при $\gamma = 99,8\%$ [14]. При изготовлении крупноформатных плат процент брака возрастает пропорционально увеличению их площади, так как распределение P_d по площади платы можно считать постоянным. Поэтому экономически целесообразным считается производство толсто пленочных плат и плат на многослойной керамике размерами не более $48 \times 60 \text{ мм}^2$ с $n_k < 6$. Тонко пленочные платы, благодаря тому, что у них $b = b_z = 0,03 \div 0,05 \text{ мм}$, позволяют достигнуть с $n_k = 2$ такой же величины $\lambda = 20 \text{ лин/мм}$, как в толсто пленочных с $n_k = 6 \div 10$ при примерно одинаковой стоимости изготовления.

Выпуск крупноформатных плат сдерживается в настоящее время отсутствием материалов, одновременно отвечающих требованиям технологического процесса создания пленочных элементов, механической прочности несущей конструкции и согласования по величине коэффициента теплового расширения с конструкционными материалами аппаратуры и безвыводных корпусов ИС.

Тонко пленочные платы, выполненные по методу «сквозного» анодирования алюминия (рис. 6 з), обладают более высокой надежностью, так как они не имеют сквозных металлизированных отверстий [15]. Существенными недостатками, ограничивающими их широкое использование, являются высокое значение C (рис. 7) и несоответствие требованиям автоматизированной сборки.

На этапе макетирования и в условиях мелкосерийного производства для монтажа ИС в микрокорпусах целесообразно использовать тонкопроводные коммутационные платы [16], которые по величине λ соответствуют толсто пленочным с $n_k = 4$ и могут достигать размеров свыше $250 \times 250 \text{ мм}^2$. По сравнению с пленочными проектирование и изготовление тонкопроводных плат существенно упрощается, так как не требует применения фотошаблонов и технологических операций формирования пленочных проводников и межслойной изоляции. Преимуществом этих плат является также сокращение длины проводников, снижение C , возможность увеличения их размеров. Применение объемного изолированного провода позволяет объединить процессы сборки и монтажа с процессами изготовления плат.

Из таблицы следует, что наиболее высокие параметры — у двуслойных тонко пленочных плат с органическим диэлектриком. Они имеют минимальные значения b , b_z , шага переходных отверстий, обладают хорошей ремонтпригодностью, сравнительно малой трудоемкостью контроля и обеспечивают монтаж ИС с любым типом выводов и поэтому наиболее полно соответствуют требованиям миниатюризации телевизионной аппаратуры. Но другие многослойные платы, имеющие преимущества, например по габаритам, количеству $n_{уд}$, величине рассеиваемой мощности и т. д., могут оказаться перспективнее для оптимизации межсхемных соединений конкретных видов аппаратуры.

Выбор конкретного типа платы для телевизионной аппаратуры зависит от многочисленных требований, предъявляемых к изготавливаемой аппаратуре, — таких, как надежность, масса, габарит, стоимость, объем выпуска, длительность разработки и изготовления, технологичность, конструктивное оформление элементной базы и пр. Совокупности этих требований, зачастую противоречивых, не удовлетворяет ни один тип платы. Поэтому их выбирают с учетом наиболее важных для конкретно разрабатываемого класса аппаратуры требований. Например, надежности и массо-габаритных показателей — для наиболее ответственной аппаратуры, технологичности, стоимости и объема производства — для аппаратуры широкого применения.

Выводы

1. Проблема комплексной миниатюризации телевизионной аппаратуры может быть решена только при условии оптимизации соединения многовыводных ИС.

2. Наиболее перспективный путь оптимизации межсхемных соединений — использование многослойных коммутационных плат с высокой плотностью расположения пассивных элементов, низкими значениями паразитной емкости, малым сопротивлением проводников и минимальным количеством внешних контактных соединений.

3. Для построения функционально законченных блоков аппаратуры, наиболее полно отвечающих требованиям оптимизации межсхемных соединений, необходимы крупноформатные платы, выполняющие роль элементов несущих конструкций и согласованные по величине коэффициента теплового расширения с материалами ИС повышенной степени интеграции.

4. Требованиям миниатюризации аппаратуры в большей степени отвечает двуслойная тонкопленочная плата с органическим диэлектриком, позволяющая устанавливать бескорпусные ИС с гибкими и ориентированными внешними выводами.

5. Выбор конкретного типа плат и технологии их изготовления определяется конструктивным исполнением используемой элементной базы, назначением аппаратуры и предъявляемыми к ней требованиями; ввиду многообразия таких требований, универсального способа построения многослойных коммутационных плат до настоящего времени не существует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лайман Дж. Пути обеспечения малых размеров элементов СБИС. «Электроника», 1980, № 14, с. 1 — 7.

2. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. М., «Радио и связь», 1981, с. 5 — 21.

3. Мягоносов П. П. и Платонов Б. Д. Влияние метода сборки БГИС на надежность и массо-габаритные характеристики МЭА. «Техника средств связи», сер. «Техника телевидения», 1983, вып. 1 (39), с. 87 — 95.

4. Волков В. А. Сборка и герметизация микроэлектронных устройств. М., «Радио и связь», 1982, с. 20.

5. Лассен Ч. Требуется новая технология межсоединений. «Электроника», 1979, т. 52, № 20, с. 24 — 35.

6. Джонс П. Р. Повышение плотности монтажа на платах. «Электроника», 1981, т. 54, № 17, с. 51 — 56.

7. Lumen J. Chir-carriers, Rin-grid arrays chang the Re-board bandesape. „Electronics“, 1981, N 26, p. 66—75.